

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Tomografické stanovení fázového složení zemin
Tomographic Analysis of Soil Phase Relationship

Student:	Marek Dobeš
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Dobeš**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: Tomografické stanovení fázového složení zemin
Tomographic Analysis of Soil Phase Relationship
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Úvod

Princip tomografické metody

Fázový model zeminy

Experimentální ověření stanovení fázového složení zemin tomografickou metodou

Vyhodnocení experimentu

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

ŠIMEK, Jiří. *Mechanika zemin*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00428-4.

KALENDER, Willi A. *Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications*. 3rd rev. ed. Erlangen: Publicis Publishing, 2011. ISBN 978-3-89578-317-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.**

Datum zadání: 31.10.2018

Datum odevzdání: 06.05.2019

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....
podpis studenta

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst.3).
- souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

Anotace

Obsahem bakalářské práce je experimentální ověření a stanovení fázového složení zemin pomocí tomografické metody. Tomografická metoda, která je také známá jako výpočetní tomografie, patří k nedestruktivním metodám testování objektů. Bakalářská práce se rozděluje do dvou částí, teoretickou a praktickou. V teoretické části se práce zabývá základním principem tomografie a stanovením fázového modelu zeminy. Praktická část se zabývá zjišťováním jednotlivých parametrů zkoumaného vzorku zeminy v laboratořích pomocí standartních klasických laboratorních metod, ale také využitím výpočetní tomografie k určení jednotlivých fází, které jsou obsaženy ve vzorku zeminy.

Klíčová slova: Tomografická metoda, výpočetní tomografie, fázové složení zeminy

Abstract

The content of bachelor thesis is the experimental verification and determination of the phase composition of soils using a tomographic method. Tomographic method, also known as computed tomography, belongs to non-destructive methods of object testing. The bachelor thesis is divided into two parts, theoretical and practical. In the theoretical part, the thesis deals with the basic principle of tomography and determination of the phase model of soil. The practical part deals with determination of individual parameters of the studied soil sample in laboratories using standard classical laboratory methods, but also with the use of computed tomography to determine the individual phases that are contained in the soil sample..

Keywords: Tomographic method, computed tomography, phase composition of soil

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Karlu Vojtasíkovi, CSc. a zaměstnancům VŠB za odborné vedení, cenné rady, vstřícnost a všestrannou pomoc, které mi byly v průběhu poskytnuty. Dále bych chtěl poděkovat Panu Ing. Kamilu Součkovi, Ph.D. a Ing. Vendule Zajícové z Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. v Ostravě, za pomoc při laboratorních analýzách a provedení RTG CT snímků a za poskytnuté cenné rady.

Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Princip tomografické metody.....	10
2.1	Zvětšení a rozlišení obrazu.....	11
2.2	Z rentgenových snímků do rozměrů	11
2.3	Rekonstrukce obrazu.....	12
2.4	Rastrová tomografie	14
2.5	Zdroj rentgenového záření	14
2.5.1	Rentgenka	14
2.5.2	Rotační osa.....	15
2.5.3	Rentgenový senzor.....	16
3.	Fázový model zeminy	17
3.1	Zemina jako třífázové prostředí	18
3.2	Popisné parametry zemin	20
3.2.1	Zdánlivá hustota pevných částic (měrná hmotnost)	20
3.2.2	Objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy	21
3.2.3	Objemová hmotnost suché zeminy	21
3.2.4	Objemová hmotnost saturované zeminy	22
3.2.5	Objemová hmotnost zeminy pod hladinou vody	22
3.2.6	Objemová tíha zeminy	23
3.2.7	Pórovitost.....	23
3.2.8	Číslo pórovitosti.....	24
3.2.9	Stupeň nasycení	24
3.2.10	Vlhkost.....	25
3.2.11	Index relativní hutnosti	25
3.2.12	Křivka zrnitosti	26
3.2.13	Účinný průměr zrn	26
3.2.14	Číslo nestejnozrnnosti.....	26
3.2.15	Číslo křivosti.....	27
4.	Experimentální ověření stanovení fázového složení zemin tomografickou metodou	28
4.1	Laboratorní metoda testování.....	29
4.2	Tomografická metoda testování.....	31
5.	Vyhodnocení experimentu	33
5.1	Laboratorní měření.....	33
5.1.1	Vzorek č. 1	33
5.1.2	Vzorek č.2	34
5.1.3	Vzorek č.3	34
5.2	Tomografická měření	35
5.2.1	Vzorek č.1	35
5.2.2	Vzorek č.2	38
5.2.3	Vzorek č.3	42
6.	Závěr.....	46

7.	Seznam obrázku.....	47
8.	Seznam tabulek.....	48
9.	Seznam použitých pramenů	49

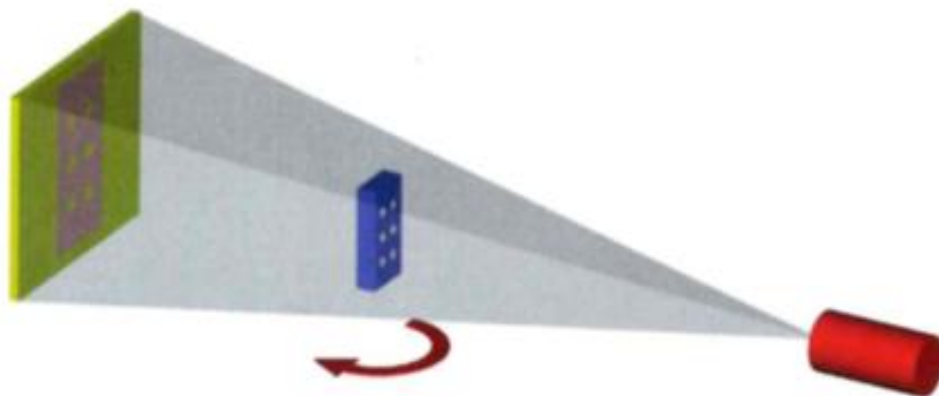
1. Úvod

Vzhledem k tomu, že zemina je partikulární materiál, tak se ve skutečnosti zkouší na vzorcích, které mají řádově větší hmotnost. Tomografická metoda umožňuje v masívech snadno zjistit rozložení jednotlivých hustot všech tří základních parametrů zemin. Tyto parametry můžeme identifikovat využitím tomografické metody na menším kousku vzorku zeminy masívu, který nebude mít tak velkou hmotnost, a u kterého se dále stanoví jednotlivé vlastnosti zeminy. Následným vyhodnocením můžeme propočítat všechny dílčí záležitosti zeminy jako jsou pórovitost, číslo pórovitosti, vlhkost a stupeň saturace. Díky možnosti nedestruktivního testování, nám tomografie umožňuje řešit všechny tyto vztahy najednou.

Smyslem práce je vyzkoušet jiný způsob určování popisných a fyzikálních parametrů zeminy, který vychází z tomografické analýzy zkoumaných vzorků zeminy. Vzorky zeminy byly prováděny na uniformním materiálu, který měl přibližně stejná zrna. V jedné z kapitol bakalářské práce se okrajově věnuji popisu principu tomografické metody. V další kapitole se věnuji etapě, která podává jednoduchý princip fázového modelu zeminy. Tento model je tvořen ze tří fází, kde jednotlivé fáze mají odlišnou hustotu. Za určitých okolností vycházíme z předpokladu, že základním parametrem je hustota zeminy, která se skládá z hustoty skeletu, vody a hustoty vzduchu, která je prakticky nulová. Na základě této fyzikální veličiny můžeme ostatní veličiny odvodit. V podstatě se jedná o základní operace, kterými se stanovují popisné a fyzikální parametry zemin, které se v dnešní době provádí několika různými individuálními zkouškami. Každá ze základních zkoušek vyžaduje odlišné laboratorní postupy, které mohou být rozděleny do několika dílčích zkoušek. Tyto dílčí zkoušky jsou náročné na měření, vážení materiálů a stanovování jednotlivých parametrů zemin pomocí tomografické metody by se mohly postupně odstranit.

2. Princip tomografické metody

Rentgenová tomografie využívá schopnost rentgenového záření pronikat skrz objekty nedestruktivním testováním. Součástí tomografie je rentgenka, kterou můžeme považovat za bodový zdroj rentgenového záření. Rentgenové paprsky procházejí měřeným objektem, tak aby dosáhly rentgenového senzoru, kde část tohoto záření je objektem absorbována. Čím delší je průniková dráha objektu, tím je záření z opačné strany objektu menší. Absorpce je závislá na typu materiálu. Tento proces je podobný k vytváření stínového obrazu, který je částečně průhledný a osvětlen bodovým zdrojem světla. Úroveň jasu v rentgenovém snímku odpovídá průhlednosti proniklých částí a závisí na jejich hustotě materiálu. Rentgenový paprsek ve tvaru kužele vytváří dvourozměrné radiografické snímky objektu. Za účelem použití tomografie na objektu je v sekvenci provedeno několik stovek až několik tisíc takových dvojrozměrných radiografických snímků. Sekvence se provádí u měřeného objektu v mnoha přesně známých otočných polohách (obr. 1). [1]

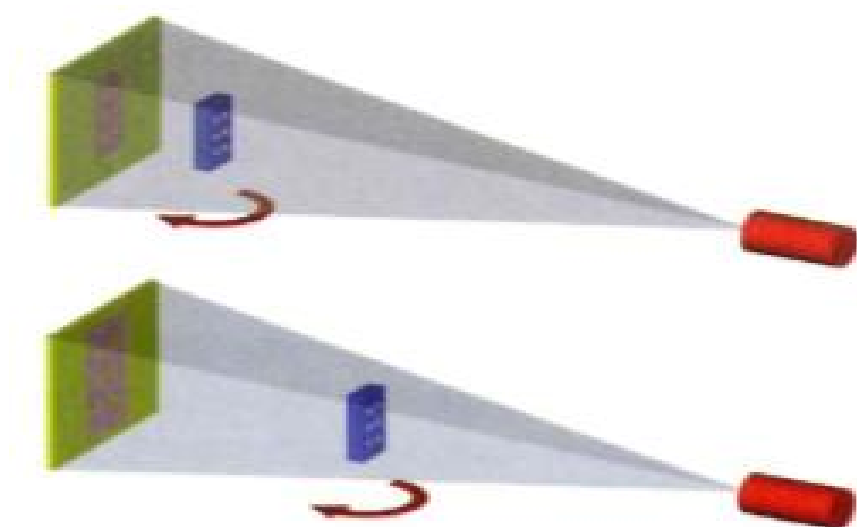


Obrázek 1- Princip rentgenové tomografie [1]

Trojrozměrná informace o měřeném objektu je obsažena v takto vytvořené sekvenci digitálního obrazu. Pomocí vhodných matematických metod lze z této sekvence vypočítat objemový model, který popisuje celou geometrii a materiálové složení zkoumaného prvku. Vzhledem k tvaru paprsku se tento proces nazývá tomografie kuželovým paprskem. [1]

2.1 Zvětšení a rozlišení obrazu

Abychom docílili zvětšení velikosti a tolerance rentgenovaného předmětu, posuneme osu otáčení a rovněž vzdálenost měřeného objektu od rentgenky. Tímto způsobem mohou být malé objekty nebo segmenty objektů měřeny při vysokém zvětšení a velké objekty mohou být zachyceny zcela v zorném poli. Volba zvětšení má výrazný vliv na rozlišení, které je dosažené při snímání prvku. (obr. 2). To je nejprve ovlivněno velikostí obrazových bodů v souřadnicích objektu (velikosti pixelů). Rozlišení je také ovlivněno velikostí ohniska (rozmazání), kvalitou rotační osy a dalšími charakteristikami, které jsou součástí stroje. Geometrické parametry pro konkrétní zvětšení, jako je poloha zdroje rentgenového záření, rentgenového senzoru a rotační osy, se stanoví pomocí vhodných kalibračních procesů. [1]

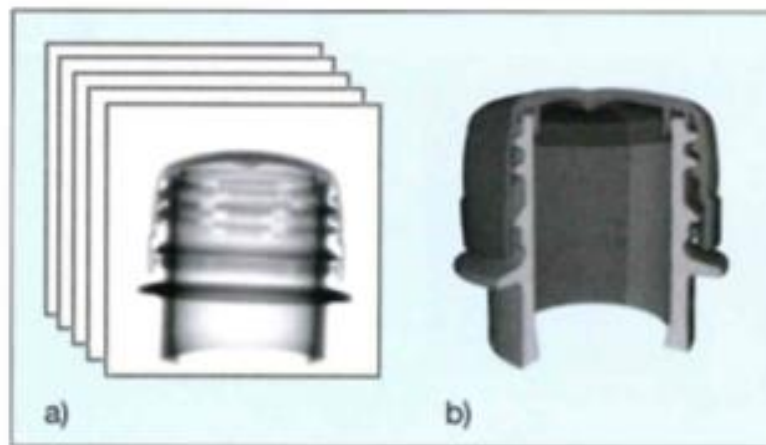


Obrázek 2- Nastavení zvětšení mezi objektem a RTG zářením [1]

2.2 Z rentgenových snímků do rozměrů

Objemová data lze vypočítat z dvourozměrných radiografických snímků. Toto je analogické s pixelem (obrazovým prvkem), který zpracovává 2D obraz pomocí sensorů používaných při lokálních intenzitách světla obrazu v ekvidistantním rovinném poli. Voxel (objemový pixel) se používá v rentgenové tomografii k popisu lokální absorpce záření v ekvidistantním prostorovém poli. Tmavé voxely představují oblasti s nízkou

absorpcí (vzduchem), zatímco světlé voxely jsou oblasti s vysokou absorpcí (kov). Data z voxelu jsou vytvořena z 2D radiografických snímků metodou filtrované zpětné projekce (obr. 3). [1]

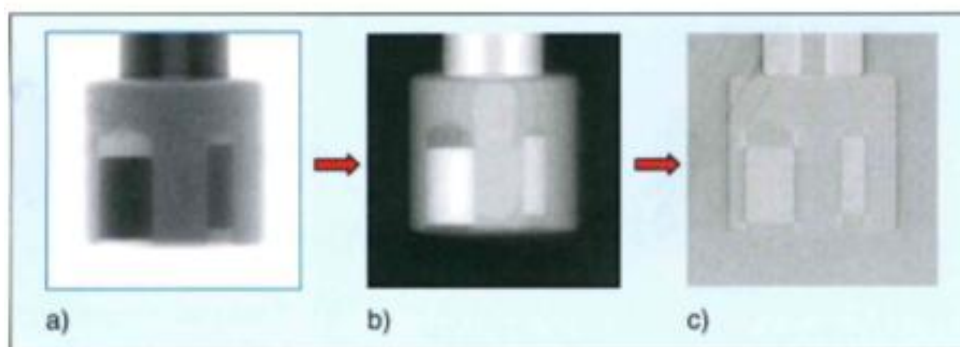


Obrázek 3- Přenesení obrazu z pixelu do voxelu [1]

2.3 Rekonstrukce obrazu

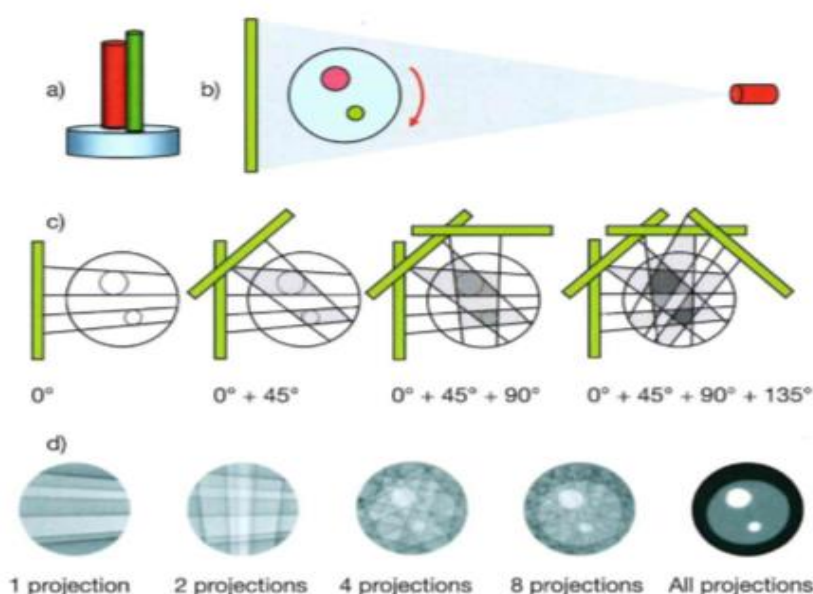
Rekonstrukce obrazu se provádí v podstatě ve třech krocích. V prvním kroku se dělá příprava dat, ve druhém se využívá metody filtrování obrazu a v posledním kroku se jedná o zpětnou projekci. Příprava zahrnuje normalizaci projekčních obrazů, následovanou převzetím logaritmu za účelem získání lineární charakteristiky. Nahrazuje exponenciálně rozpadající se chování paprsku pronikajícího materiálem. Hodnoty šedi v projekčních obrazech již neodpovídají naměřeným intenzitám, spíše jsou součtem hodnot absorpce nebo hustoty objektu podél dráhy rentgenového paprsku. Tento součet je také znám jako křivkový integrál. [1]

Filtrování obrazu je proces, při kterém zvýšíme intenzitu hran a tím provádíme zaostření objektu. To si lze představit jako zaostřování digitální fotografie pomocí softwaru pro zpracování obrazu, které je zaostřováno pomocí filtrační funkce. Tento proces je velmi důležitý z hlediska matematického zpracování (obr. 4). [1]



Obrázek 4-Krok přípravy a filtrování obrazu [1]

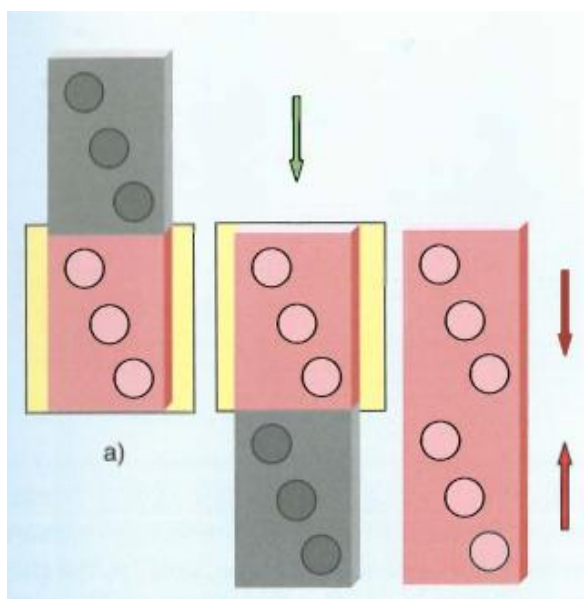
Po filtrování jsou stávající projekční obrazy promítány zpětně, běžně známé jako zpětná projekce. Zpětnou projekci 2D rentgenových snímků si lze představit tak, že postup pro generování promítacích obrazů za použití měřicího stroje je pomocí softwaru matematicky obrácen. Zpětná projekce se provádí pro všechny vytvořené radiografické snímky ve směru umístění ohniska, s ohledem na geometrické polohy příslušných součástí stroje a rotační polohy objektu. Virtuální objem měřeného objektu je tak vytvořen překrytím. Každá z projekčních hodnot, má různou rotační pozici, která se přidává k podélné dráze paprsku. Tento princip se provádí stejným způsobem jako původní měření. Rekonstrukce obrazu je dokončena tehdy, pokud jsou všechny měřené projekční obrazy zpětně promítnuty (obr. 5). [1]



Obrázek 5- Zpětné promítání filtrovaných snímků [1]

2.4 Rastrová tomografie

Někdy nelze celý měřený objekt zachytit na jednom snímku. Zorné pole rentgenového senzoru, které je definované v rovině objektu vybraným zvětšením, může být menší než měřený objekt ve všech nebo v určitých rotačních polohách. K tomu nám slouží rastrová tomografie. Některé segmenty měřeného objektu jsou zachyceny v sekvenci. Jednotlivé snímky jsou uloženy do stohu. Odpovídající informace pixelu nebo voxelu jsou sloučeny dohromady pro analýzu celého objektu, tak aby vytvořily jeden celý objekt obrazu (obr. 6). [1]



Obrázek 6- Tomografie pro sloučení obrazu objektu [1]

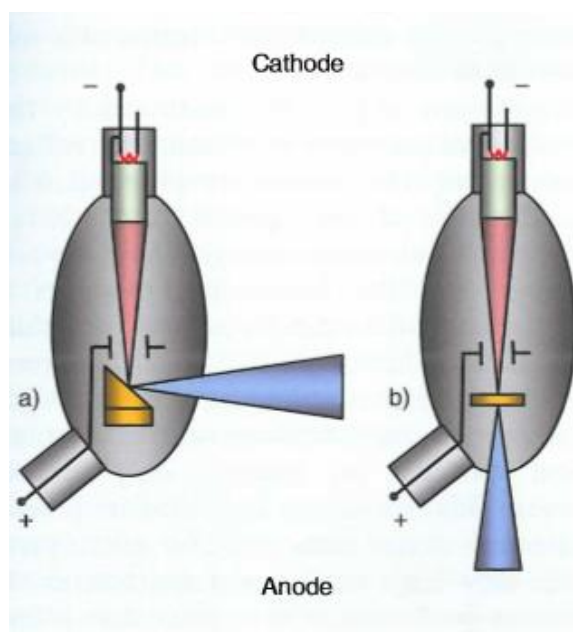
2.5 Zdroj rentgenového záření

2.5.1 Rentgenka

Pro zdroj rentgenového záření se využívá rentgenek. Rentgenka je používána pro generování rentgenových paprsků, které jsou základní složkou rentgenových tomografických strojů. Pracují na základním principu elektronových paprsků. V praxi se jedná o to, že se volné elektrony generují ve vakuu pomocí termionické emise a jsou urychlovány elektrickým polem, které je generováno napětím mezi dvěma kovovými elektrodami. V rentgence dopadá elektronový paprsek na kovový povrch terče. Je-li

zrychlovací napětí dostatečně vysoké, aby kinetická energie elektronů byla dostatečná, pak se vytvoří rentgenové paprsky, které mají formu vysokofrekvenčního elektromagnetického záření. Frekvenční rozsah rentgenových paprsků závisí na napětí mezi katodou, anodou a na cílovém materiálu (obr. 7). [1]

Záření z rentgenky lze považovat za tok fotonů, které mají různou frekvenci, protože energie fotonu je přímo úměrná a vybrané elektrické napětí ovlivňuje frekvenci, a tím i energii fotonů v rentgence. Terče rentgenek jsou klasifikovány jako odrazové a transmisní. Rozdíl mezi nimi je ve výkonu radiace, době měření a minimální velikosti ohniskového bodu. [1]



Obrázek 7- Princip tvorby RTG paprsků u odrazových a transmisních terčů [1]

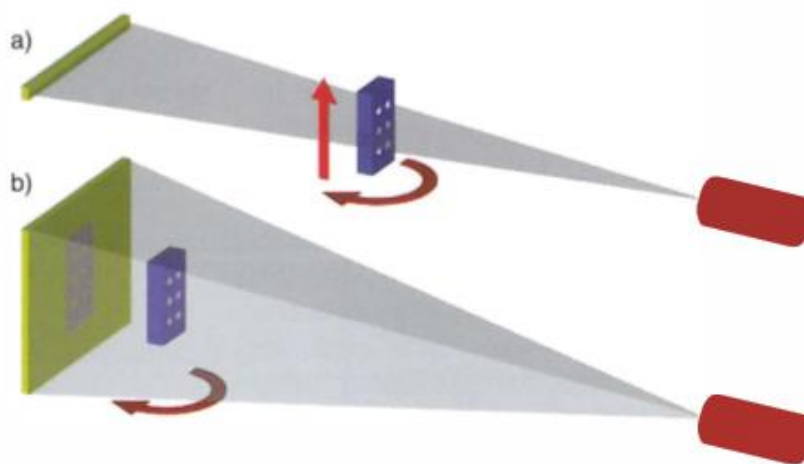
2.5.2 Rotační osa

Není důležité, zda se rentgenový zdroj a senzor otáčí kolem měřeného objektu anebo se měřený objekt otáčí v dráze paprsku. Pro metrologické aplikace má stroj stacionární rentgenovou jednotku a rotační osu pro objekt. Vlastnosti rotační osy ovlivňují výsledky měření v radiálním a axiálním směru. Kromě radiálních a axiálních odchylek je třeba vzít v úvahu také kolísání osy otáčení a účinku jiných částí stroje. Požadavky na vlastnosti rotační osy jsou vysoké zejména pokud se jedná o velké průměry

objektu. Objekty menších průměrů mají nižší požadavky na rotační osu. Rotační osa musí být schopna zajistit požadovanou přesnost při zatížení hmotou objektu v upínacím zařízení. [1]

2.5.3 Rentgenový senzor

Rentgenové senzory jsou dostupné jako podélné a oblastní senzory (obr. 8). Právě podélné senzory by byly perfektní z geometrického hlediska. Synchronizovaný pohyb rentgenového zdroje a podélného snímače měří objekt ve směru rotační osy. Rotační osu lze zajistit tak, aby rovina řezu procházela objektem vždy kolmo k ose rotace. Nevýhodou této metody je, že každá rovina řezu musí být snímána individuálně v každé otočné poloze. Energie rentgenového zdroje je využívána mnohem méně efektivněji, protože se používá pouze jeden paprsek kužele. Podle počtu čar na senzoru se používají oblastní senzory, které najednou zachytí několik rovin řezu měřeného objektu. Čím menší je úhel kužele, tím menší jsou chyby v měření, to znamená, že má smysl navrhovat vysoce přesné stroje s větší vzdáleností mezi rentgenovým zdrojem a senzorem. [1]



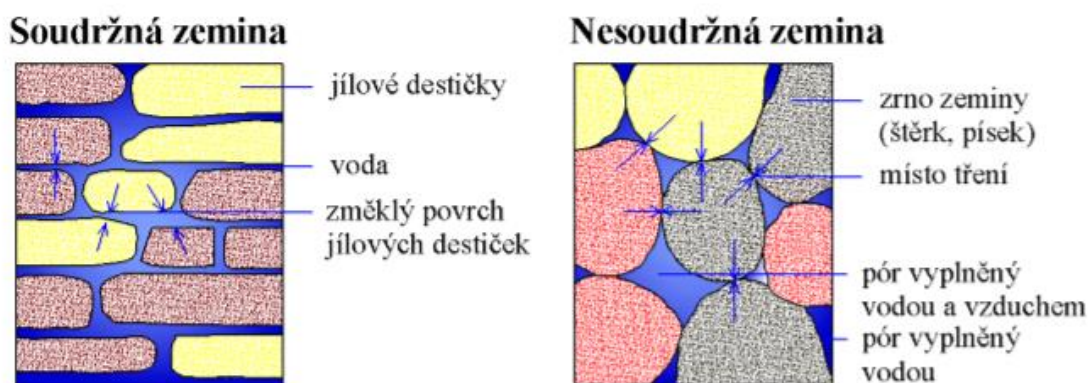
Obrázek 8-Podélné a oblastní rentgenové senzory [1]

3. Fázový model zeminy

Zemina je velmi složitý materiál, který vzniká v průběhu geologických procesů zvětrávání, transportu a sedimentace z vyvřelých, hlubinných i sedimentárních skalních hornin. Je to termín, který se používá v inženýrsko-geologické klasifikaci hornin, na kterou se lze dívat jako na prostředí, ve kterém je prováděna stavební činnost, a tím dochází k interakci horní konstrukce, základové konstrukce a podloží. Zeminu tedy můžeme rozdělit do dvou skupin jako soudržnou a nesoudržnou (obr. 9). [2]

Soudržné zeminy jako je jíla a hlína jsou schopny plastických deformací. Zdrojem pevnosti ve smyku jsou u soudržných zemin molekulární a chemické vazby mezi částicemi zemin. V suchém stavu jsou křehké a ve stavu vlhkém jsou tvárné, z toho důvodu dobře absorbují vodu, mohou bobtnat, popřípadě při vysoušení u nich může dojít ke smrštění. [3]

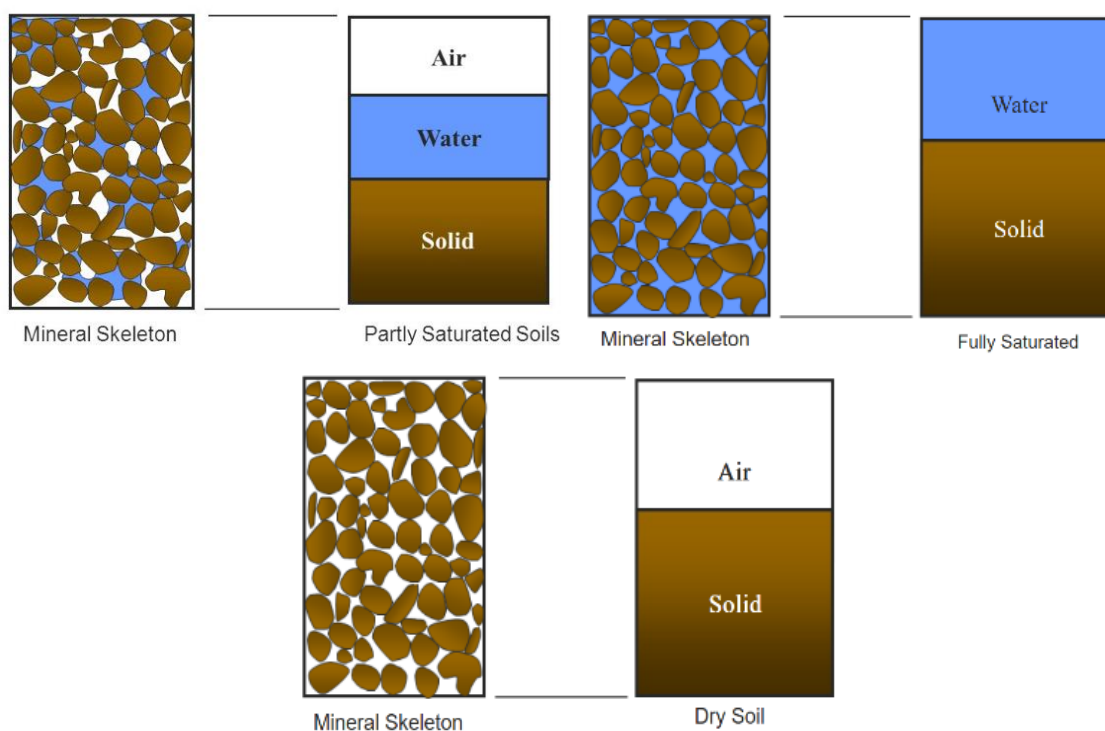
Nesoudržné zeminy (štěrk, písek) špatně zadržují vodu a jsou charakteristické velkými póry, které jsou vyplněny tekutinou. Nesoudržné zeminy jsou charakterizovány třecími silami na styčných plochách mezi jednotlivými zrn. Tření je ovlivněno pevností, rozměrem, tvarem a způsobem uložení jednotlivých zrn. [4]



Obrázek 9-Soudržná a nesoudržná zemina [4]

3.1 Zemina jako třífázové prostředí

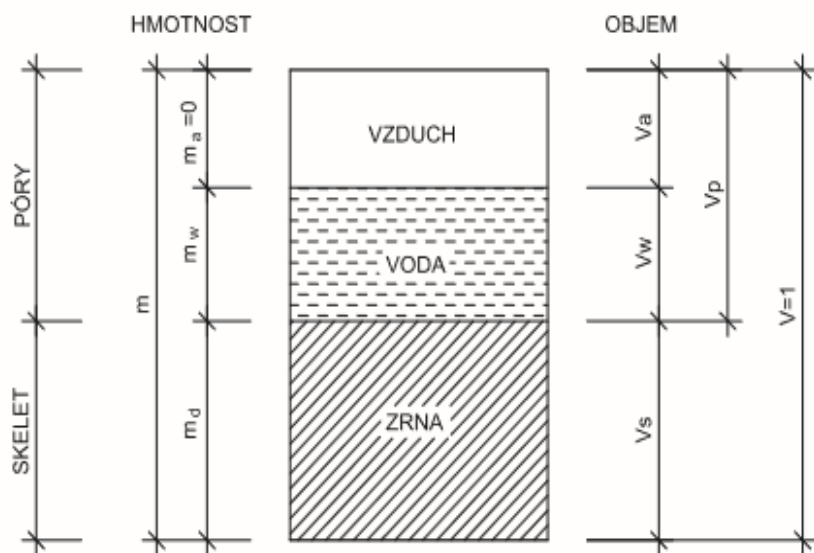
Vzhledem k tomu, že relativní podíl tří fází se liší v jakémkoliv zemním ložisku, je užitečné zvážit model zeminy, který zřetelně představuje tyto fáze. Zeminy mohou být částečně nasycené, ve kterých je přítomen vzduch i voda. Mohou být také zcela nasycené, které neobsahují vzduch nebo mohou být dokonale suché, které jsou bez obsahu vody, jenž leží ve dvojfázovém prostředí (obr. 10). [5]



Obrázek 10-Jednotlivé fáze zemin [6]

Z fyzikálního hlediska jsou zeminy velmi složité látky, které jsou tvořeny z pevných minerálních zrn různých velikostí a tvarů, mezi kterými se nacházejí mezery, nazývané se póry. Póry mohou být částečně vyplněny kapalinou nebo plynem a tvoří složitý, klikatý prostorový systém s proměnlivými průřezy, který je v obecném případě vyplněn částečně vodou, částečně vzduchem. Obsah vody a vzduchu se snadno mění při změnách okolních podmínek a umístěním v půdě. Zemina se tedy liší od jiných látek zejména tím, že se skládá ze tří fází- fáze pevné, kapalná a plynná (obr. 11). [7]

Vlastnosti půdy závisejí na velikosti a tvaru jednotlivých fází, na jejich relativních objemech, měrné tíze a na interakci mezi nimi. Tyto fáze ovlivňují chování zemin a určují základní fyzikální charakteristiky vzájemným poměrem pevné, kapalné a plynné fáze, i když pevné částice a jejich vlastnosti hrají rozhodující úlohu v určování. [7]



Obrázek 11- Trojfázové prostředí zemin [7]

3.2 Popisné parametry zemin

Popisné parametry zemin blíže popisují složení zeminy, vyjadřují její hmotu a vztahy mezi jednotlivými fázemi. Mezi tyto parametry patří např. objemová hmotnost, objemová tíha, vlhkost, pórovitost, stupeň nasycení atd.

3.2.1 Zdánlivá hustota pevných částic (měrná hmotnost)

Měrná hmotnost, také nazývána jako zdánlivá hustota pevných částic, je definovaná jako hmotnost objemové jednotky pevných částic (tedy bez pórů).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad [\text{kg/cm}^3] \quad (3.1)$$

M_s -hmotnost pevných částic vysušené zeminy [kg],

V_s -objem pevných částic [m³].

Pokud pevné částice obsahují uzavřené vnitřní póry, hovoříme potom o tzv. zdánlivé hustotě. Hustota zeminy se stanovuje v laboratořích pomocí pyknometrické zkoušky při vysušování na 105 až 110 °C.

$$\rho_s = \frac{(m_2 - m_1) \cdot \rho_k}{V \cdot \rho_k + m_2 - m_3} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.2)$$

V -objem pyknometru [cm³],

m_1 -hmotnost prázdného pyknometru [g],

m_2 -hmotnost pyknometru se suchou navážkou [g],

m_3 -hmotnost pyknometru se vzorkem zeminy po doplnění kapalinou [g],

ρ_k -hustota použité kapaliny při 20 °C [g/cm³],

při použití vody $\rho_k = \rho_w = 0,998$ [g/cm³].

3.2.2 Objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy

Objemová hmotnost je hmotnost jednotkového objemu zeminy i s póry, které mohou být vyplněny částečně nebo úplně vodou, případně vzduchem.

$$\rho = (1-n) \cdot \rho_s + n \cdot S_r \cdot \rho_w \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.3)$$

n -pórovitost [%],

S_r -stupeň nasycení [%],

ρ_s -objemová hmotnost pevných částic [kg/m^3],

ρ_w -objemová hmotnost vody [kg/m^3].

Objemovou hmotnost lze rovněž stanovit jako poměr hmotnosti přirozeně vlhkého vzorku k jeho objemu.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.4)$$

m -hmotnost vzorku [kg],

V -objem vzorku [m^3].

3.2.3 Objemová hmotnost suché zeminy

Objemová hmotnost suché zeminy stanovuje poměr mezi hmotnostmi pevných částic suché zeminy při teplotě 105 až 110 °C a celkovým objemem zeminy.

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.5)$$

m_d -hmotnost pevných částic suché zeminy [kg],

V -celkový objem [m^3].

Objemovou hmotnost suché zeminy lze rovněž definovat jako poměr hmotnosti suchého vzorku k původnímu objemu vlhkého vzorku.

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.6)$$

ρ -objemová hmotnost vlhké zeminy $[\text{kg/m}^3]$,

w -vlhkost [%].

3.2.4 Objemová hmotnost saturované zeminy

Je to objemová hmotnost zeminy, jejíž póry jsou zcela zaplněny vodou

$$\rho_{\text{sat}} = (1-n) \cdot \rho_s + n \cdot \rho_w \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.7)$$

ρ_s -objemová hmotnost pevných částic $[\text{kg/m}^3]$,

ρ_w -objemová hmotnost vody $[\text{kg/m}^3]$,

n -pórovitost [%].

3.2.5 Objemová hmotnost zeminy pod hladinou vody

Zeminy, které obsahují v pórech gravitační vodu, jejíž hmotnost zrn musíme zmenšit o vztlak, který nadlehčuje zrna o tíhy vytlačené vody. Objemová hmotnost pod hladinou vody je rovna objemové hmotnosti saturované zeminy zmenšené o objemovou hmotnost vody.

$$\rho_{\text{su}} = (1-n) \cdot (\rho_s - \rho_w) = \rho_{\text{sat}} - \rho_w \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.8)$$

ρ_s -objemová hmotnost pevných částic $[\text{kg/m}^3]$,

ρ_w -objemová hmotnost vody $[\text{kg/m}^3]$,

ρ_{sat} -objemová hmotnost saturované zeminy $[\text{kg/m}^3]$,

ρ_w -objemová hmotnost vody $[\text{kg/m}^3]$,

n -pórovitost [%].

3.2.6 Objemová tíha zeminy

Objemová tíha zeminy je v přírodě namáhána její vlastní silou, která je definovaná jako tíha objemové jednotky zeminy.

$$\gamma = \rho \cdot g \quad [\text{kN/m}^3] \quad (3.8)$$

ρ -objemová hmotnost zeminy $[\text{kg/m}^3]$,

g -tíhové zrychlení $[\text{m/s}^2]$

3.2.7 Pórovitost

Pórovitost určujeme jako podíl objemu pórů k celkovému objemu zeminy vyjádřený v procentech. Nejčastější stanovení pórovitosti se určuje pomocí objemové hmotnosti suché zeminy a měrné hmotnosti.

$$n = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad [\%] \quad (3.9)$$

V_p -objem pórů v zemině $[\text{m}^3]$,

V -celkový objem zeminy $[\text{m}^3]$,

V_s -objem pevných částic v zemině $[\text{m}^3]$,

ρ_d -objemová hmotnost suché zeminy $[\text{kg/m}^3]$,

ρ_s -objemová hmotnost pevných částic $[\text{kg/m}^3]$.

3.2.8 Číslo pórovitosti

Číslo pórovitosti se definuje jako poměr objemu pórů k objemu pevných částic.

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad [/] \quad (3.9)$$

V_p -objem pórů v zemině $[m^3]$,

V_s -objem pevných částic v zemině $[m^3]$,

ρ_d -objemová hmotnost suché zeminy $[kg/m^3]$,

ρ_s -objemová hmotnost pevných částic $[kg/m^3]$.

3.2.9 Stupeň nasycení

Nasycení neboli saturace je míněno jako procento vody, které zaujímá pórovité prostory přítomné v zemině. Je definováno jako poměr objemu vody v pórech zeminy k objemu pórů a zpravidla se udává jako bezrozměrné číslo. Při plném nasycení vodou se stupeň nasycení rovná jedné ($S_r=1$).

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} = \frac{\rho - \rho_d}{\rho_w \cdot n} \quad [\%] \quad (3.10)$$

V_w -objem vody $[m^3]$,

V_p -objem pórů v zemině $[m^3]$,

ρ -objemová hmotnost v přirozeném uložení $[kg/m^3]$,

ρ_d -objemová hmotnost suché zeminy $[kg/m^3]$,

ρ_w -objemová hmotnost vody $[kg/m^3]$,

n -pórovitost $[\%]$.

3.2.10 Vlhkost

Vlhkost zeminy je definována pro všechny zeminy, jenž je charakterizována jako poměr hmotnosti vody v pórech zeminy k hmotnosti skeletu zeminy, která se stanovuje v laboratořích na základě vysoušení vody při teplotě 105 až 110 °C.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 = \frac{m - m_d}{m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.11)$$

m_w -hmotnost vody [kg],

m_d -hmotnost pevných částic suché zeminy [kg],

m -celková hmotnost vzorku [kg].

3.2.11 Index relativní hutnosti

Základním ukazatelem stavu nesoudržných (sypkých) zemin je index relativní hutnosti, kde vzájemné uspořádání částic výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti zemin.

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad [\%] \quad (3.12)$$

e -číslo pórovitosti v přirozeném uložení,

e_{\max} -maximální číslo pórovitosti při nejnakypřenějším uložení zrn,

e_{\min} -minimální číslo pórovitosti při nejhutnějším uložení zrn.

Stav	Relativní ulehlost I_D
kyprý	0,00 až 0,33
středně uhlý	0,33 až 0,67
ulehlý	0,67 až 1,00

Tabulka 1- Stav nesoudržných zemin

3.2.12 Křivka zrnitosti

Křivka zrnitosti je součtová čára, jejíž každý bod udává procentuální zastoupení všech zrn menších než daný průměr. Rozměry zrn se pohybují v rozsáhlém rozmezí, od tisícín až po desetiny i stovky milimetrů. Obsah drobných částic ovlivňuje vlastnosti zeminy větší mírou než hrubší zrna, z toho důvodu se křivky zrnitosti znázorňují v semilogaritmických souřadnicích. Logaritmické vyjádření průměrů umožňuje dostatečně přesné znázornění podílu všech průměrů až do nejmenších. V mechanice zemin se určité zrnitostní skupiny označují společnými názvy, protože hranice mezi nimi jsou konvenční. Křivky zrnitosti mají různorodé tvary, které mohou být příkré nebo protáhlé. Podle sklonu, tvaru a polohy můžeme z křivky zrnitosti určit stručnou charakteristiku údajů zjišťované zeminy, jako je účinný průměr zrn d_{ef} , číslo nestejnozrnnosti C_u a číslo křivosti C_c . [8]

3.2.13 Účinný průměr zrn

Účinný průměr zrn je průměr stejně velkých kulovitých zrn myšlené ideální zeminy, který se pohybuje v oblasti malých zrn a v určitém ohledu (např. z hlediska propustnosti) má stejné vlastnosti jako skutečná zemina. Nejčastěji se udává v rozmezí 10 až 20% ($d_{ef} = d_{10}$ až d_{20}). [8]

3.2.14 Číslo nestejnozrnnosti

Charakterizuje sklon střední části křivky zrnitosti a je rozhodujícím kvalitativním znakem nesoudržných zemin, které je definováno jako poměr průměrů zrn.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

d_{10} -velikost zrn při 10% propadu

d_{60} -velikost zrn při 60% propadu.

Označení zeminy podle čísla nestejnozrnnosti je uvedeno v tabulce č.2

Hodnota	Označení zeminy
$C_u < 5$	stejnozrnná zemina
$5 < C_u < 15$	střední nestejnozrnná zemina
$C_u > 15$	nestejnozrnná zemina

Tabulka 2- Označení zemin podle čísla nestejnozrnnosti

3.2.15 Číslo křivosti

Charakterizuje přibližný tvar křivky zrnitosti a je pomocnou hodnotou v klasifikaci zemin, který se určuje poměr průměrů zrn.

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$$

d_{10} – velikost zrn při 10% propadu,

d_{30} – velikost zrn při 30% propadu,

d_{60} – velikost zrn při 60% propadu.

Zeminy s hodnotami $C_c = 1$ až 3 jsou považovány za dobře zrněné a jejich křivka zrnitosti má plynulý průběh. Zeminy, které nepatří do této skupiny, mají hodnotu čísla křivosti $C_c < 1$ nebo > 3 a jejich křivka zrnitosti má stupňovitý průběh s vodorovnými nebo málo stoupajícími úseky. Tyto zeminy mají chybějící frakce a mohou mít nepříznivé vlastnosti.

[8]

4. Experimentální ověření stanovení fázového složení zemin tomografickou metodou

V této kapitole se popisují metody, které se používají ke zjištění popisných a fyzikálních parametrů zeminy. Cílem tohoto experimentu je stanovit jednotlivé parametry zeminy rozdílnými procesy. Experimentální stanovení složení zemin probíhá dvěma způsoby. Jedním ze způsobů je stanovení popisných a fyzikálních parametrů zemin základním laboratorním postupem. Druhý způsob stanovení zeminy je pomocí tomografické metody, která využívá zpracování dvourozměrného obrazu. Pro tento experiment je použit uniformní vzorek zeminy, jehož zrna jsou přibližně stejné velikosti kulovitého tvaru. Jedná se o zrna písku, která zůstala na síti o velikosti 0,250mm (obr. 12).



Obrázek 12-Detail zrn zeminy [Autor]

4.1 Laboratorní metoda testování

Součástí laboratorního testování jsme připravili vzorek zeminy písku, u kterého jsme stanovili základní parametry. Jako první krok jsme provedli měření a vážení plastové váženky. Průměr váženky je 2,0 cm a její výška je 3,0 cm. Následným získáním základních rozměrů jsme dopočetli objem váženky, který má tvar válce (obr. 13).



Obrázek 13- Vzorek váženky se zeminou [Autor]

V dalším kroku jsme provedli zvážení prázdné nádoby, kterou jsme zapsali do tabulky hodnot. Po zvážení prázdné nádoby, jsme dopočetli hodnotu objemu váženky. Vzorek zeminy se pomalu sypal do váženky umístěné na digitální váze, která zaznamenala výsledky měření (obr. 14).



Obrázek 14- Digitální váha se vzorkem [Autor]

Pro tento experiment jsme si připravili tři váženky. Všechny tři váženky byly nejprve samostatně zváženy na digitální váze a zapsány do tabulky. Váženky byly naplněny zeminou, která obsahovala přibližně stejné množství zrn. První vzorek obsahoval pouze suchou složku zeminy bez obsahu destilované vody. Druhý vzorek se plně nasýtil destilovanou vodou až po okraj váženky. Do posledního vzorku se přidalo pár kapek destilované vody, která zcela nezaplňovala objem váženky. Tyto naměřené hodnoty jednotlivých vzorků se zapsaly do níže uvedené tabulky.

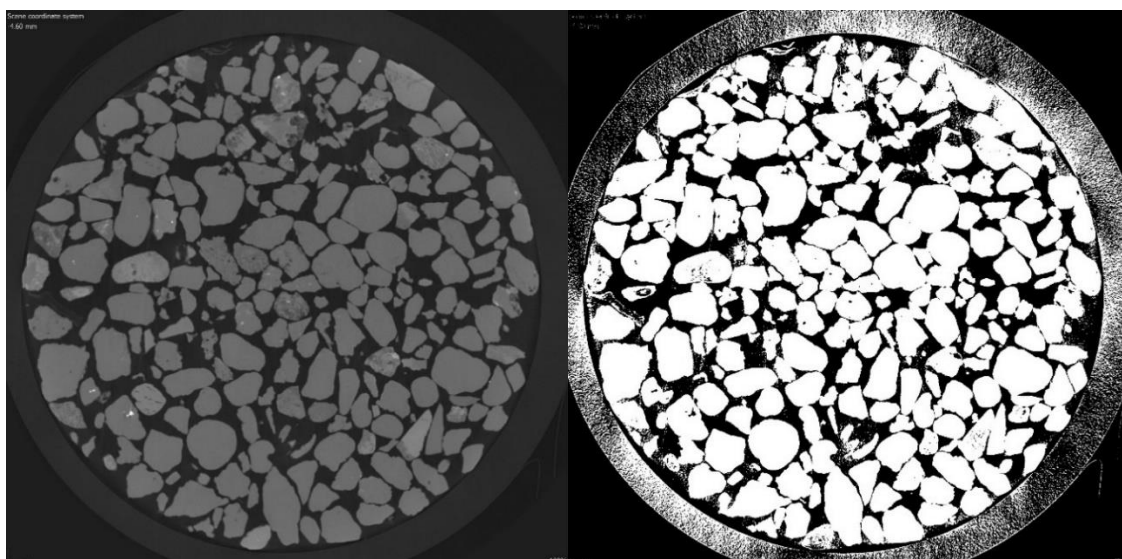
číslo vzorku	hmotnost váženka [g]	hmotnost váženky se zeminou [g]	hmotnost zeminy s vodou [g]	objem vody [cm ³]	hmotnost zemina [g]
1	3,809	17,104	17,104	0	13,295
2	3,755	17,109	20,501	3,328	13,354
3	3,767	17,106	18,734	1,597	13,339

Tabulka 3- Naměřené hodnoty

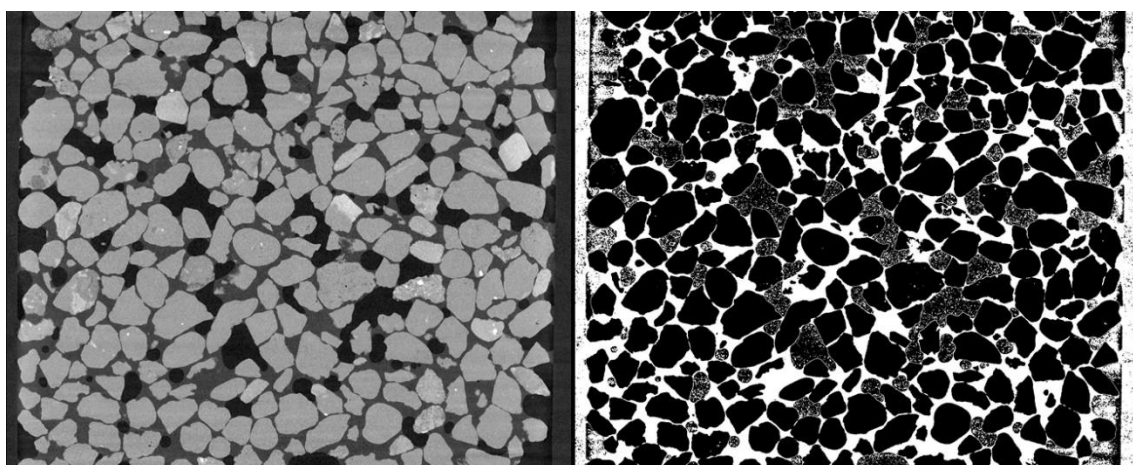
Po určení základních hodnot zeminy a váženky, jsme dále vypočítali vlhkost všech jednotlivých vzorků, kterou jsme stanovili základním výpočtem. Po určení vlhkosti jsme provedli určení objemu pórů a zrn ve všech třech vzorcích. Při výpočtu objemových veličin jsme vycházeli ze specifické objemové tíhy materiálu, která je běžná pro typ zrn naší zeminy. V literatuře je specifická objemová tíha naší zeminy vyjádřena číslem 2,65 [g/cm³]. Po určení objemových hustot jsme pak vypočetli další parametry zeminy, kterými jsou pórovitost, číslo pórovitosti a stupeň nasycení.

4.2 Tomografická metoda testování

Identické vzorky zeminy testované v laboratoři jsme předali na Ústav geoniky v Ostravě, kde byly podrobně prohlédnuty tomografickou metodou. Jednotlivé vzorky byly zpracovány v tomografu kruhovým a obdélníkovým průřezem. Výsledkem měření pomocí tomografie bylo získání snímků vzorků zeminy. Tomografickou metodou jsme získali větší počet nasnímaných snímků. Celkový počet snímků jednoho vzorku v jednom průřezu byl 720. Tyto snímky jsem dále náhodným výběrem vygeneroval, takže jsem zredukoval počet snímků, a to na 20 snímků s kruhovým průřezem (obr. 15) a 20 snímků s obdélníkovým průřezem (obr. 16). Tyto snímky jsem následně vyhodnotil jako obrazy. Obrazy obsahovaly půdní částice, které měly různé procentuální zastoupení stupně šedé barvy, kde každý odstín šedé barvy odpovídal hustotě každé částice. Aby bylo spočítat základní parametry z obrazu vzorku, musely být tyto odstíny světlé šedé plochy odlišeny od odstínů tmavší šedé plochy. K tomuto odlišení jsem použil software ImageJ, který odlišuje odstíny světlé plochy od tmavší pomocí prahového filtru. Práh filtru umožňuje vybrat obrazy s různými hodnotami šedé barvy a nahradit ho bílými nebo černými barvami. Výsledkem je obraz, který se skládal pouze z bílých a černých barev místo několika odstínů šedé barvy. Jednou z funkcí softwaru je také histogram, který umožňuje určit procentuální zastoupení jednotlivých barev ve snímku. Rozmezí barev na jednotlivých snímcích se odlišuje, a to v rozmezí 0 až 255, kde 0 představovala hodnotu bílé barvy a hodnota 255 představovala barvu černou.



Obrázek 15- Kruhový sken vzorku před a po prahování [Autor]



Obrázek 16- Obdélníkový sken vzorku před a po prahování [Autor]

5. Vyhodnocení experimentu

V této závěrečné kapitole jsou vyhodnoceny výsledky experimentu pro laboratorní a tomografickou metodu. Pomocí jednotlivých výpočtů jsme zjistili, že výsledky veličin získané laboratorní metodou jsou přibližně shodné s výsledky tomografické metody. Jednotlivé výsledky jsou uvedeny v tabulkách.

5.1 Laboratorní měření

5.1.1 Vzorek č. 1

Vzorek číslo 1 byl v suchém stavu, který neobsahoval žádnou vodu.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100\% = \frac{0}{13,295} = 0 \%$$

$$V_s = \frac{m_d}{G_s} = \frac{13,295}{2,65} = 5,017 \text{ cm}^3$$

$$V_p = V - V_s = 8,473 - 5,017 = 3,456 \text{ cm}^3$$

$$n = \frac{V_p}{V} \cdot 100 = \frac{3,456}{9} \cdot 100 = 40,788 \%$$

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{3,983}{5,017} = 0,689$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \cdot 100 = \frac{0}{3,983} \cdot 100 = 0 \%$$

5.1.2 Vzorek č.2

Vzorek číslo 2 byl plně nasycen vodou.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100\% = 24,918 \%$$

$$V_s = \frac{m_d}{G_s} = \frac{13,354}{2,65} = 5,039 \text{ cm}^3$$

$$V_p = V - V_s = 8,473 - 5,039 = 3,434 \text{ cm}^3$$

$$n = \frac{V_p}{V} \cdot 100 = \frac{3,434}{9} = 40,525 \%$$

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{3,961}{5,039} = 0,681$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \cdot 100 = 96,910 \%$$

5.1.3 Vzorek č.3

Vzorek číslo 3 byl v polosuchém stavu, který obsahoval malé množství vody.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100\% = 11,973 \%$$

$$V_s = \frac{m_d}{G_s} = \frac{13,339}{2,65} = 5,034 \text{ cm}^3$$

$$V_p = V - V_s = 8,473 - 5,034 = 3,439 \text{ cm}^3$$

$$n = \frac{V_p}{V} \cdot 100 = 40,592 \%$$

$$e = \frac{V_p}{V_s} = 0,683$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \cdot 100 = 46,436 \%$$

číslo vzorku	w [%]	objem zrn [cm ³]	objem pórů [cm ³]	n [%]	e	S _r [%]
1	0	5,0169811	3,4559159	40,78789	0,6888437	0
2	24,918	5,0392453	3,4336517	40,52512	0,6813821	96,910004
3	11,9729	5,0335849	3,4393121	40,59192	0,6832729	46,435681

Tabulka 4- Výsledné hodnoty laboratorních vzorků

5.2 Tomografická měření

5.2.1 Vzorek č.1

číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
zastoupení zrn %	62,03	61,68	62,52	62,99	64,18	63,75	65,52	64,84	65,12	64,37
zastoupení pórů- vzduch %	37,97	38,32	37,48	37,01	35,82	36,25	34,48	35,16	34,88	35,63

číslo vzorku	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
zastoupení zrn %	63,12	63,47	61,77	62,84	63,88	62,57	62,33	63,56	63,27	62,69
zastoupení pórů- vzduch %	36,88	36,53	38,23	37,16	36,12	37,43	37,67	36,44	36,73	37,31

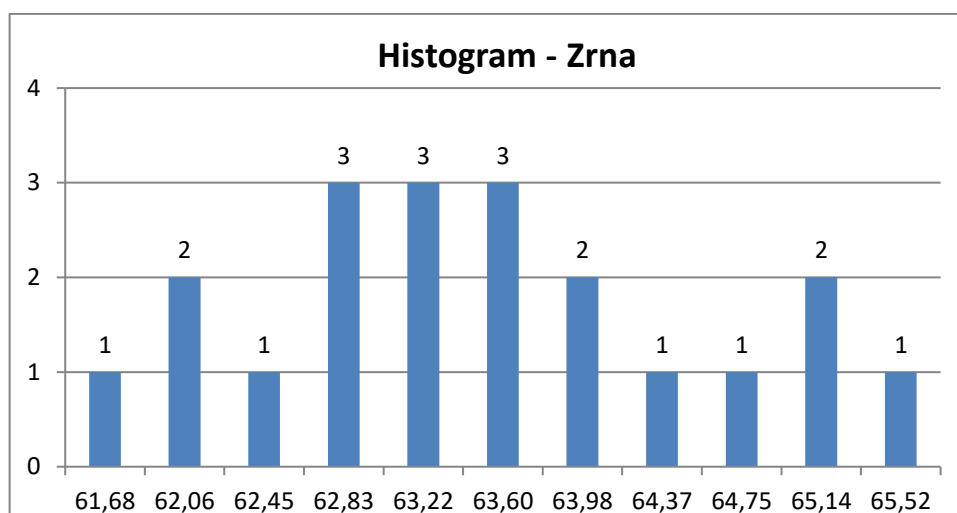
Tabulka 5- Obsah zrn a pórů

Počet vzorků je 20. Suchý vzorek obsahuje zrna a póry vzduchu. Nejmenší hustota zrn v suchém vzorku je 61,68 %. Největší hustota zrn v suchém vzorku je 65,52 %. Střední hodnota je 63,20 %. Nejdůležitější význam v tabulce má průměrná hodnota.

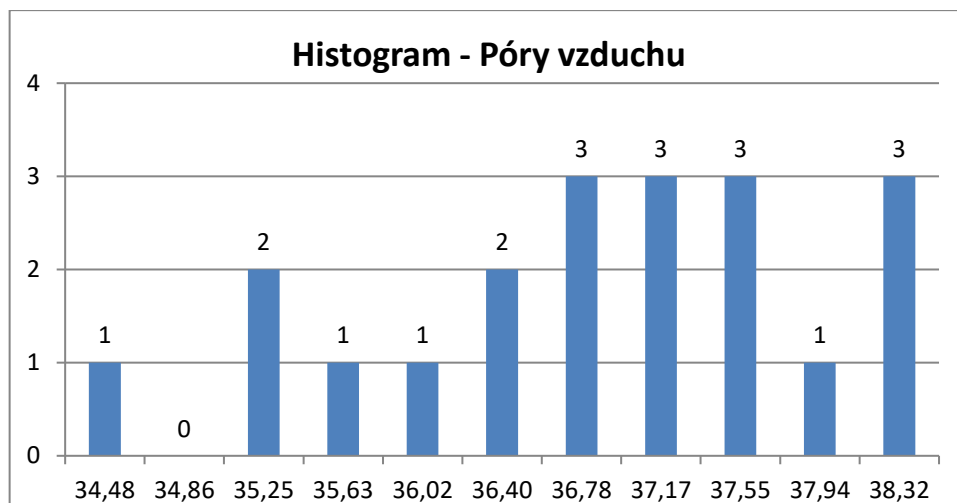
U zrn je průměrná hodnota 63,33 %. Nejmenší hustota pórů vzduchu v suchém vzorku je 34,48 %. Největší hustota zrn v suchém vzorku je 38,32 %. Střední hodnota je 36,81%. Průměrná hodnota pórů vzduchu je 36,67 %.

Suchý vzorek- zrna		Suchý vzorek- póry vzduch	
Počet vzorků	20	Počet vzorků	20
Min	61,68	Min	34,48
Max	65,52	Max	38,32
Rozsah	3,84	Rozsah	3,84
Průměrná hodnota	63,33	Průměrná hodnota	36,67
Medián	63,20	Medián	36,81
Průměrná odchylka	0,88	Průměrná odchylka	0,88
Variace	1,13	Variace	1,13
Standartní odchylka	1,06	Standartní odchylka	1,06
Koeficient variace	1,68	Koeficient variace	2,89
Pravděpodobnost P [%]	95	Pravděpodobnost P [%]	95
Interval spolehlivosti	62,83 - 63,82	Interval spolehlivosti	36,18 - 37,17

Tabulka 6 - Údaje o zrnech a pórech vzduchu



Obrázek 17- Histogram zrn vzorku č.1



Obrázek 18- Histogram pórů vzduchu vzorku č.1

$$V_s = 63,33 \%$$

$$V_{p-vzduch} = 36,67 \%$$

$$n = \frac{V_p}{V} = 36,67 \%$$

$$e = \frac{V_p}{V_s} = 0,579$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} = 0 \%$$

5.2.2 Vzorek č.2

číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
zastoupení zrn %	60,26	60,91	60,93	60,45	60,18	60,89	61,59	62,43	62,81	62,66
zastoupení pórů- vzduch %	3,92	3,67	3,4	3,42	3,87	3,88	3,57	3,08	3,1	2,83
zastoupení pórů- voda %	35,82	35,42	35,67	36,13	35,95	35,23	34,84	34,49	34,09	34,51

číslo vzorku	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
zastoupení zrn %	62,57	62,89	62,69	62,32	61,24	60,84	60,62	61,4	61,66	61,47
zastoupení pórů- vzduch %	2,26	2,05	2,19	2,34	2,11	2,19	2,07	2,12	1,98	2,05
zastoupení pórů- voda %	35,17	35,06	35,12	35,34	36,65	36,97	37,31	36,48	36,36	36,48

Tabulka 7- Obsah zrn a pórů

Počet vzorků je 20. Plně nasycený vzorek obsahuje zrna, póry vzduchu a vody. Nejmenší hustota zrn vzorku je 60,18 %. Největší hustota zrn vzorku je 62,89 %. Střední hodnota je 61,44 %. Průměrná hodnota zrn je 61,54 %.

Nejmenší hustota vzorku obsahující póry vzduchu je 1,98 %. Největší hustota vzorku obsahující póry vzduchu je 3,92%. Střední hodnota je 2,59%. Průměrná hodnota pórů vzduchu je 2,81 %.

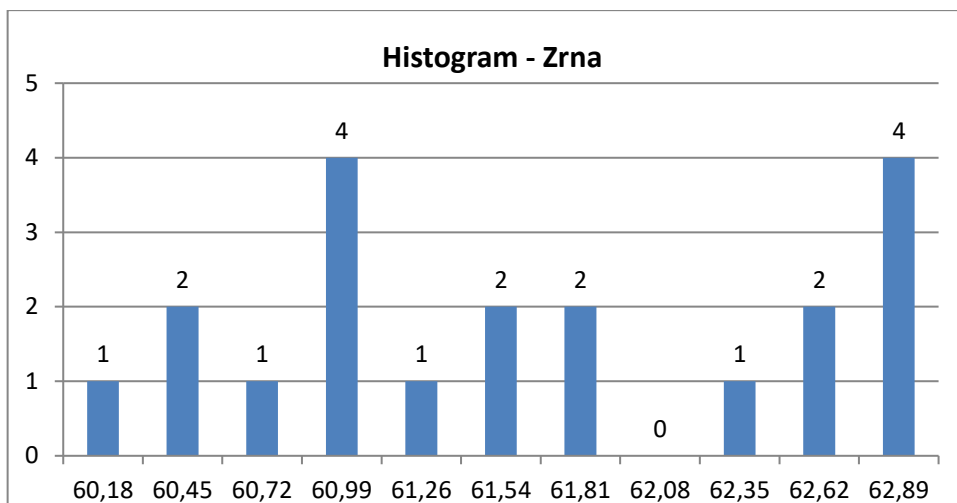
Nejmenší hustota vzorku obsahující póry vody je 34,09 %. Největší hustota vzorku obsahující póry vody je 37,31%. Střední hodnota je 35,55 %. Průměrná hodnota pórů vody je 35,65 %.

Plně nasycený vzorek- zrna	
Počet vzorků	20
Min	60,18
Max	62,89
Rozsah	2,71
Průměrná hodnota	61,54
Medián	61,44
Průměrná odchylka	0,78
Variace	0,79
Standartní odchylka	0,89
Koeficient variace	1,44
Pravděpodobnost P [%]	95
Interval spolehlivosti	61,12 - 61,96

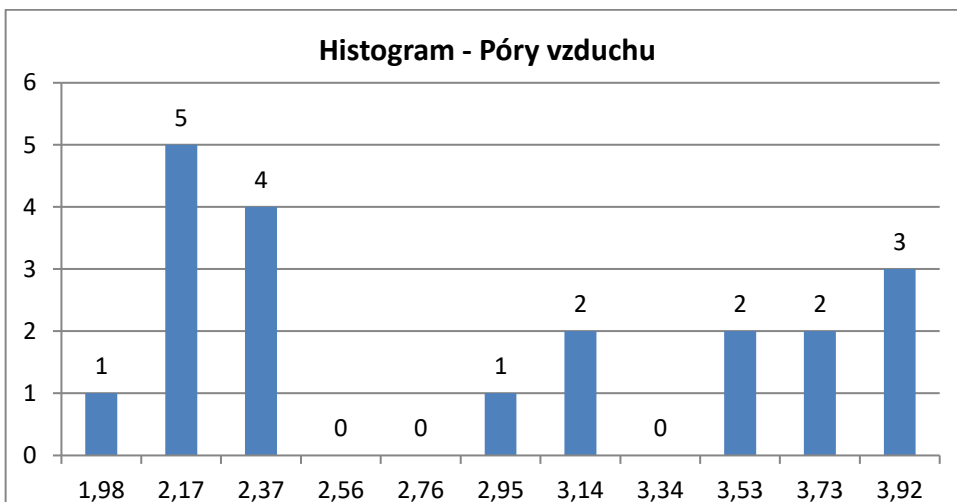
Plně nasycený vzorek- póry vzduch	
Počet vzorků	20
Min	1,98
Max	3,92
Rozsah	1,94
Průměrná hodnota	2,81
Medián	2,59
Průměrná odchylka	0,67
Variace	0,52
Standartní odchylka	0,72
Koeficient variace	25,64
Pravděpodobnost P [%]	95
Interval spolehlivosti	2,47 - 3,14

Plně nasycený vzorek- póry voda	
Počet vzorků	20
Min	34,09
Max	37,31
Rozsah	3,22
Průměrná hodnota	35,65
Medián	35,55
Průměrná odchylka	0,73
Variace	0,73
Standartní odchylka	0,86
Koeficient variace	2,40
Pravděpodobnost P [%]	95
Interval spolehlivosti	35,25 - 36,06

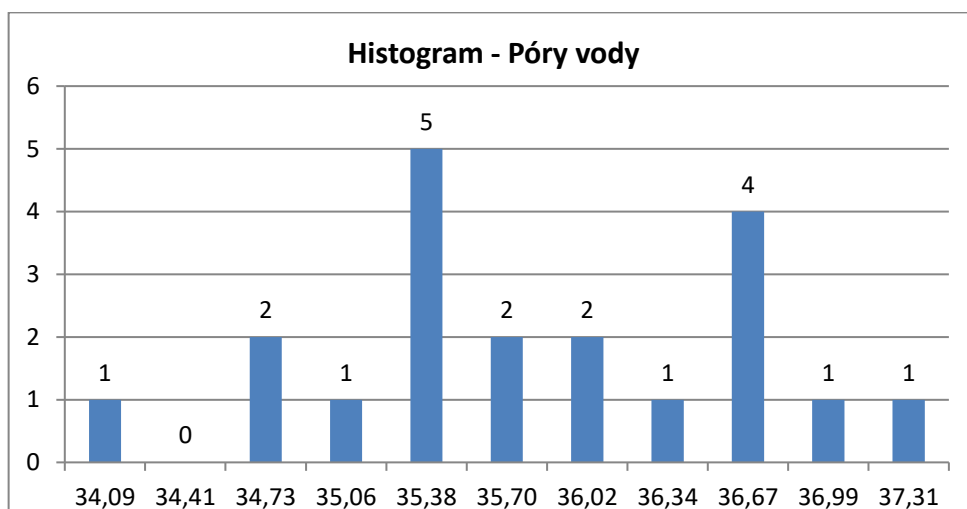
Tabulka 8-Údaje o zrnech a pórech vzduchu a vody



Obrázek 19- Histogram zrn vzorku č.2



Obrázek 20- Histogram pórů vzduchu vzorku č.2



Obrázek 21- Histogram pórů vody vzorku č.2

$$V_s = 61,54 \%$$

$$V_{p-vzduch} = 2,81 \%$$

$$V_{p-voda} = 35,65 \%$$

$$n = \frac{V_p}{V} = 38,46 \%$$

$$e = \frac{V_p}{V_s} = 0,625$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} = 92,694 \%$$

5.2.3 Vzorek č.3

číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
zastoupení zrn %	62,76	61,33	59,87	58,38	57,47	58,25	58,09	59,65	61,04	60,29
zastoupení pórů- vzduch %	22,5	24,76	23,51	25,32	27,21	26,91	26,59	26,26	24,03	24,05
zastoupení pórů- voda %	14,74	13,91	17,62	16,3	16,32	14,84	15,32	14,09	14,93	15,66

číslo vzorku	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
zastoupení zrn	61,23	60,85	60,19	61,29	61,69	61,91	61,41	61,1	61,43	60,93
zastoupení pórů- vzduch	23,39	21,94	22,31	21,68	21,26	21,89	21,12	21,09	21,48	21,27
zastoupení pórů- voda	15,38	17,21	17,5	17,03	17,05	16,2	17,47	17,81	17,09	17,8

Tabulka 9- Obsah zrn a pórů

Počet vzorků je 20. Polosuchý vzorek obsahuje zrna, póry vzduchu a vody. Nejmenší hustota zrn vzorku je 57,47 %. Největší hustota zrn vzorku je 62,76 %. Střední hodnota je 60,99 %. Průměrná hodnota zrn je 60,46 %.

Nejmenší hustota vzorku obsahující póry vzduchu je 21,09 %. Největší hustota vzorku obsahující póry vzduchu je 27,21 %. Střední hodnota je 22,95%. Průměrná hodnota pórů vzduchu je 23,43 %.

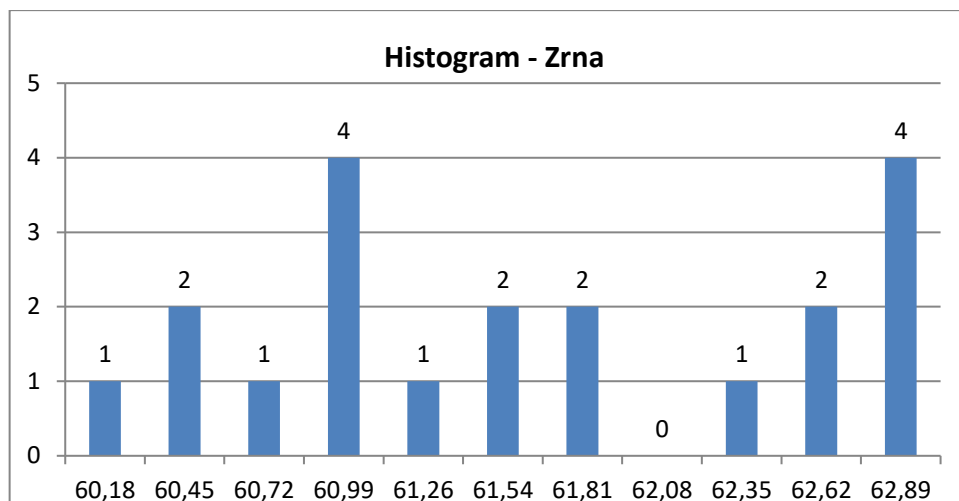
Nejmenší hustota vzorku obsahující póry vody je 13,91 %. Největší hustota vzorku obsahující póry vody je 17,81%. Střední hodnota je 16,31 %. Průměrná hodnota pórů vody je 16,21 %

Polosuchý vzorek- zrna	
Počet vzorků	20
Min	57,47
Max	62,76
Rozsah	5,29
Průměrná hodnota	60,46
Medián	60,99
Průměrná odchylka	1,15
Variace	1,94
Standartní odchylka	1,39
Koeficient variace	2,30
Pravděpodobnost P [%]	95
Interval spolehlivosti	59,81 - 61,11

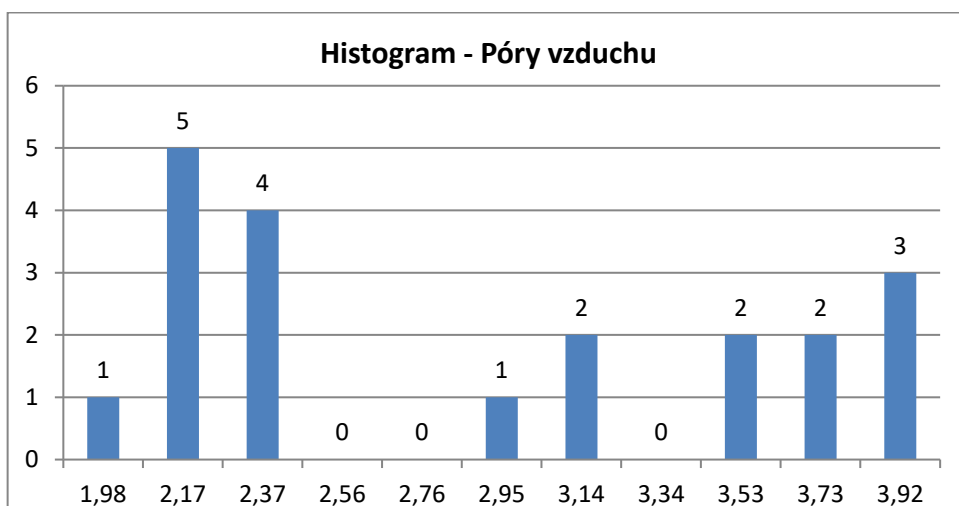
Polosuchý vzorek- póry vzduchu	
Počet vzorků	20
Min	21,09
Max	27,21
Rozsah	6,12
Průměrná hodnota	23,46
Medián	22,95
Průměrná odchylka	1,78
Variace	4,21
Standartní odchylka	2,05
Koeficient variace	8,76
Pravděpodobnost P [%]	95
Interval spolehlivosti	22,47 - 24,39

Polosuchý vzorek- póry vzduchu	
Počet vzorků	20
Min	13,91
Max	17,81
Rozsah	3,90
Průměrná hodnota	16,08
Medián	16,21
Průměrná odchylka	1,09
Variace	1,54
Standartní odchylka	1,24
Koeficient variace	7,65
Pravděpodobnost P [%]	95
Interval spolehlivosti	15,63 - 16,79

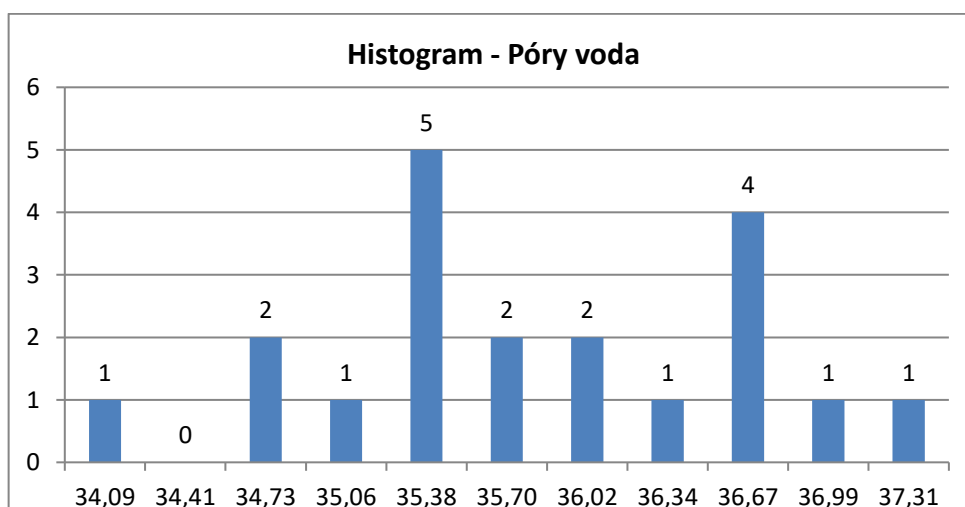
Tabulka 10- Údaje o zrnech a pórech vzduchu a vody



Obrázek 22- Histogram zrn vzorku č.3



Obrázek 23- Histogram pórů vzduchu vzorku č.3



Obrázek 24- Histogram pórů vody vzorku č.3

$$V_s = 60,46 \%$$

$$V_{p-vzduch} = 23,46 \%$$

$$V_{p-voda} = 16,08 \%$$

$$n = \frac{V_p}{V} = 39,54 \%$$

$$e = \frac{V_p}{V_s} = 0,654$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} = 40,668 \%$$

číslo vzorku	n [%]	e	S _r [%]
1	36,67	0,579	0
2	38,46	0,625	92,69
3	39,54	0,654	40,668

Tabulka 9- Výsledné hodnoty tomografické analýzy vzorků

6. Závěr

Předložená bakalářská práce si kladla za cíl určit fyzikální a popisné parametry zemin pomocí tomografické metody. V současné době se zjišťují parametry pouze pomocí základních laboratorních měření. Měření pomocí tomografie by nám umožnila odstranit dílčí zkoušky laboratorního měření. Jedná se o první experimentální pokus, který byl prováděn na uniformní zemině. Měření se provádělo na určitém typickém vzorku zeminy, která měla přibližně stejný tvar zrn a nebyla odebrána běžným způsobem. Pro tento experiment bylo vhodné použít pouze sypké, poloplastické zeminy, které neobsahovaly příliš jemných frakcí.

Výsledkem porovnání obou metod měření se liší nejvíce pouze u vzorku č.1 (suchý vzorek), kde číslo pórovitosti dosahuje rozdíl až 10 %. U ostatních měřených vzorků je rozdíl pouze do 5 %. Chybný výsledek měření mohl vzniknout vlivem teploty, hmotností váženky nebo nedostatečným množstvím testovaných vzorků v laboratoři. Je třeba se zamyslet, jestli bychom nedostali přesnější hodnoty měření, kdyby bylo provedeno laboratorní měření na větším počtu vzorků.

Určitě by bylo zajímavé pokračovat v budoucnu v tomto experimentu a pokusit se zjistit křivku zrnitosti zeminy. Rovněž by bylo zajímavé, zda je tato metoda vhodná pro jiný druh zeminy nebo je-li možné experiment provádět na zeminách, které mají různou velikost zrn.

7. Seznam obrázku

<i>Obrázek 1- Princip rentgenové tomografie [1]</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 2- Nastavení zvětšení mezi objektem a RTG zářením [1].....</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 3- Přenesení obrazu z pixelu do voxelu [1].....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 4-Krok přípravy a filtrování obrazu [1].....</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 5- Zpětné promítání filtrovaných snímků [1]</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 6- Tomografie pro sloučení obrazu objektu [1]</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 7- Princip tvorby RTG paprsků u odrazových a transmisních terčů [1]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 8-Podélné a oblastní rentgenové senzory [1]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 9-Soudržná a nesoudržná zemina [4].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 10-Jednotlivé fáze zemin [6]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 11- Trojfázové prostředí zemin [4]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 12-Detail zrn zeminy [Autor]</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 13- Vzorek váženky se zeminou [Autor]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 14- Digitální váha se vzorkem [Autor]</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 15- Kruhový sken vzorku před a po prahování [Autor]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 16- Obdélníkový sken vzorku před a po prahování [Autor].....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 17- Histogram zrn vzorku č.1</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 18- Histogram pórů vzduchu vzorku č.1</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 19- Histogram zrn vzorku č.2</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 20- Histogram pórů vzduchu vzorku č.2</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 21- Histogram pórů vody vzorku č.2</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 22- Histogram zrn vzorku č.3.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 23- Histogram pórů vzduchu vzorku č.3</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 24- Histogram pórů vody vzorku č.3</i>	<i>44</i>

8. Seznam tabulek

<i>Tabulka 1- Stav nesoudržných zemin.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 2- Označení zemin podle čísla nestejnozrnosti.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 3- Naměřené hodnoty.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4- Výsledné hodnoty laboratorních vzorků.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 5- Obsah zrn a pórů.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 6 - Údaje o zrnech a pórech vzduchu</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 7- Obsah zrn a pórů.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 8-Údaje o zrnech a pórech vzduchu a vody.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 9- Výsledné hodnoty tomografické analýzy vzorků.....</i>	<i>45</i>

9. Seznam použitých pramenů

- [1] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *X-ray Tomography in Industrial Metrology: Precise, Economical and Universal*. Munich : Süddeutscher Verlag onpact GmbH, 2012. ISBN 9783862360451
- [2] URL:< <https://opentextbc.ca/geology/chapter/5-4-weathering-and-the-formation-of-soil> > [online]. 2019 [citováno 20. Dubna 2019]
- [3] URL:<<http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BM02-Pozemni%20komunikace%20II/Pozemni%20komunikace%20II%20-%20Zeminy,%20zemni%20prace.pdf>> [online]. 2019 [citováno 20. Dubna 2019]
- [4] LIPINSKÝ, V. *Detekce infiltrace srážkové vody metodou EIS*: diplomová práce. Brno, 2011. 88 s., 18 s. příl. Vysoké učení technické v Brně. Ústav vodních staveb. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. JANA PAŘÍLKOVÁ, CSc.
- [5] URL:<<https://nptel.ac.in/courses/105103097/5>> [online]. 2019 [citováno 20. Dubna 2019]
- [6] URL:<<https://www.slideshare.net/hronaldo10/class-1-moisture-content-specific-gravity-geotechnical-engineering>> [online]. 2019 [citováno 21. Dubna 2019]
- [7] URL:<<http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BF02-Mechanika%20zemin/BF02-Mechanika%20zemin%20M02-Vlastnosti%20zemin.pdf>> [online]. 2019 [citováno 24. Dubna 2019]
- [8] ŠIMEK, J., JESENÁK, J., ELRICH, J., VANÍČEK, I.,: *Mechanika zemin*. Praha: SNTL, 1990. ISBN 8003004284.